

# 汽车轻量化专题之二：汽车蒙皮镁合金化前景

## 1. 汽车蒙皮材质演进史

汽车蒙皮（Body Skin），即覆盖于车身骨架外部的面板结构件，包括引擎盖、车门板、车顶盖、翼子板、行李箱盖等，是汽车覆盖件系统的主要构成部分。

图 1：汽车蒙皮示意图



资料来源：车讯网《大通 G10 拆解测评》

蒙皮材质的选择需要在成型工艺性、结构强度、耐腐蚀性能、整备质量和制造成本之间寻求精密的工程平衡。回顾汽车工业百余年发展历程，蒙皮材质的演进可划分为三个典型阶段，每一阶段的更迭都深刻反映了当时产业技术水平和市场需求的核心矛盾。

### 1.1 第一阶段：普通钢板时代（1900s-1970s）

汽车工业诞生之初，车身蒙皮几乎全部采用低碳钢板冲压成型。钢板的优势在于：强度可靠、成型工艺成熟、原材料成本低廉。福特 T 型车开创的流水线大规模生产模式，正是建立在钢板易于标准化冲压制造的基础之上。

然而，普通钢板的致命缺陷在于耐腐蚀性严重不足。低碳钢在雨雪、盐雾、工业酸雨等环境介质中极易发生电化学锈蚀，严重影响车身结构寿命和外观质量。这一时期的汽车产品往往在使用 3-5 年后即出现明显的锈蚀穿孔问题，在寒冷地区使用融雪盐的道路环境下尤为突出。耐腐蚀性短板成为制约汽车产品品质提升的核心痛点。

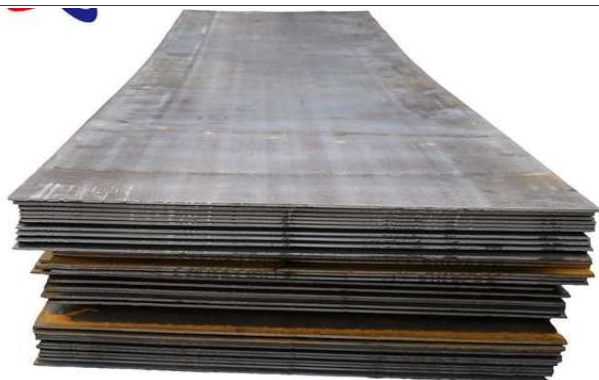
### 1.2 第二阶段：镀锌钢板普及时代（1980s-2000s）

随着消费者对汽车耐久性要求的持续提升，以及汽车出口贸易带来的海运防锈刚需，镀锌钢板逐步取代普通钢板成为全球汽车蒙皮的主流材料。

镀锌层的防护机理基于牺牲阳极的阴极保护原理：锌的标准电极电位（ $-0.76\text{V}$ ）低于铁的电极电位（ $-0.44\text{V}$ ），在腐蚀介质中锌层优先发生氧化反应，从而保护基体钢板不受侵蚀。以大众汽车集团为代表，早在 1980 年代就开始在奥迪车型上批量采用双面镀锌钢板，并率先提出“10 年不锈穿”的防腐质量承诺，这一标准后来成为全球汽车行业的通用技术标杆。

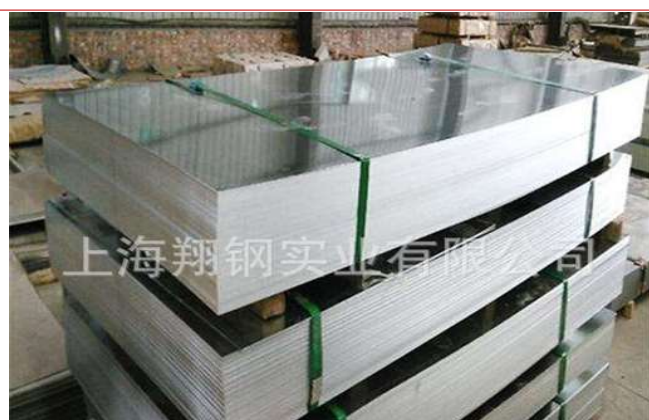
此后，热镀锌钢板（GI, Hot-Dip Galvanized）和合金化镀锌钢板（GA, Galvannealed）相继实现大规模产业化应用。GA 钢板通过镀后热处理使锌层与铁基体发生合金化反应，形成 Zn-Fe 合金层，在保持良好耐蚀性的同时显著提升焊接性和涂装附着力，至今仍是全球汽车蒙皮的绝对主流材料。

**图 2：低碳热轧钢板**



资料来源：1688 网上店铺截图

**图 3：热镀锌板**



资料来源：1688 网上店铺截图

### 1.3 第三阶段：轻量化材料探索时代（2010s-至今）

进入 21 世纪第二个十年，全球碳排放法规日趋严格，轻量化作为降低能耗的直接有效手段，其战略价值日益凸显。

铝合金凭借密度仅为钢材的 1/3（ $2.70\text{g/cm}^3$  vs.  $7.86\text{g/cm}^3$ ）的显著优势，率先进入车身蒙皮领域的产业化探索。捷豹 XJ（2003 年换代）、奥迪 A8（1994 年首发全铝车身）、福特 F-150（2015 年完成铝车身切换）等标杆车型先后尝试大规模采用铝合金蒙皮乃至全铝车身架构。

然而，这一轻量化趋势在 2020 年代出现了明显的分化与回调——铝合金蒙皮的应用非但没有如预期般持续扩大，反而呈现收缩态势。部分曾采用铝蒙皮的车型在中期改款后又悄然换回镀锌钢板。这一“逆替代”现象揭示了铝合金作为蒙皮主流材料的深层次困境，也为未来镁合金的登场埋下了产业逻辑的伏笔。

小结：汽车蒙皮材质的演进并非单纯由技术先进性驱动，而是“减重收益—制造成本—工艺可行性”三者博弈的结果。镀锌钢板以优异的成本性能和成熟的供应链体系建立了深厚的产业护城河，铝合金用二十年时间证明了轻量化的价值却始终未能撼动这一格局。当镁合金以更极致的减重潜力和更具竞争力的成本结构进入视野时，蒙皮材质的第三次范式跃迁或许正在酝酿。

## 2、铝合金蒙皮为何未能成为主流

铝合金蒙皮的理论优势毋庸置疑：密度低、比强度高、回收残值高、耐腐蚀性优于普通钢材。然而，经过二十余年的产业化探索，铝合金始终未能在蒙皮领域撼动镀锌钢板的统治地位。究其原因，材料成本、工艺改造成本、以及减重效果的边际折扣形成了三重难以逾越的壁垒。

### 2.1 材料成本制约：铝价高企与波动剧烈

铝蒙皮大规模普及的最大障碍来自材料成本端。车身蒙皮属于典型的大规模量产零部件，单车蒙皮面积，AB 级车平均约  $15\text{ m}^2$  左右，SUV 平均在  $22\text{ m}^2$  左右。材料成本差异被百万辆级的产量急剧放大。

根据 iFIND 数据，2020 年后，国内铝合金价格长期高于 15000 人民币/吨，2026 年以来甚至达到 25000 元/吨。

图 4：2016-2026 国内铝合金价格（元/吨）



资料来源：iFIND

汽车用冷轧镀锌钢板价格长期维持在 4,000-6,000 元/吨区间，仅为铝价的 1/4 至 1/3。如果铝合金蒙皮以镀锌板同样厚度，则价格差与重量差抵消，两者总成本一样，但铝合金更轻。但是，钢的弹性模量约为 210 GPa，铝合金只有约 70 GPa（约为钢的 1/3），要达到和钢板一样的刚度、抗凹性能，铝合金板的厚度必须按比例增加，通常是增加 50%。这使得铝合金的用量增加一半，成本增加，减重却没有达到镀锌板的三分之一，经济上不划算。

## 2.2 工艺改造成本：冲压与连接技术复杂

铝板的冲压成型难度远高于钢板，这是制约其大规模应用的第二个核心因素。铝合金的延伸率较低（典型汽车铝板断后伸长率约 20-25%，深冲钢可达 40%以上），回弹量大，对模具设计和冲压工艺提出更高要求。铝板冲压的起皱、开裂缺陷率显著高于钢板，导致良率损失和模具寿命缩短。

同时，铝蒙皮与钢骨架的连接涉及电化学腐蚀风险。由于铝与钢之间存在显著的电极电位差（铝约-1.66V，钢约-0.44V），在潮湿环境中接触面极易发生电偶腐蚀。为此需要采用自冲铆接（SPR）、结构胶粘接、流钻螺钉（FDS）等特殊连接工艺，生产线改造成本高昂。以福特 F-150 为例，其 2015 年铝车身切换投入超过 10 亿美元进行产线改造，包括新增 SPR 铆接机器人、改造涂装车间以适应铝板表面处理要求等。

## 2.3 减重效果的边际折扣

铝合金轻量化效果在整车层面存在显著的“刚度补偿折扣”。由于铝的弹性模量仅为钢的 1/3（约 70GPa vs. 210GPa），为满足同等弯曲刚度和扭转刚度要



求，铝板通常需要增厚约 50%。以 0.7mm 钢板为基准，等效刚度的铝板厚度需达 1.0-1.1mm。综合计算，铝蒙皮的实际减重效果往往只有理论值（密度比 1:3）的 50%-60%。

此外，当动力系统能效持续提升（如混动专用发动机热效率突破 45%、纯电驱动系统效率超 90%）后，车身减重的边际节油/节电收益有所下降。车企对高价轻量化材料的支付意愿随之减弱，尤其是在新能源车价格竞争白热化的背景下，降本增效成为压倒性的经营诉求。

小结：铝合金蒙皮未能普及的根本原因可归结为“成本-收益”模型不成立——材料成本高出钢材 3-4 倍，产线改造成本动辄数亿元，而实际减重效果又受制于刚度补偿的显著折扣。在这一产业逻辑下，行业开始寻找比铝更轻、成本更具竞争力的替代材料。

### 3、镁合金成为蒙皮材质的可能性分析

镁的密度仅 1.74g/cm<sup>3</sup>，是铝的 64%、钢的 22%，是目前已知可大规模工业化应用的最轻金属结构材料。事实上，汽车工业对镁合金的关注由来已久——大众汽车早在 2000 年代初就发表论文探讨“镁的新时代”，通用汽车也在 2012 年宣布攻克热压镁技术。然而，受制于价格高、易腐蚀、难变形三大瓶颈，镁合金长期局限于方向盘骨架、仪表盘支架等内饰密闭小件，始终未能进入蒙皮等外覆盖件领域。

2024 年以来，这一局面正在发生根本性改变。镁铝价格比历史性跌破 0.7、半固态成型与耐蚀表面处理技术系统性突破、《压铸镁合金》新国标落地规范行业标准，三重力量形成共振，镁合金从“实验室材料”走向“量产装车”的产业化临界点已经到来。

#### 3.1 减重效应量化测算

镁合金的轻量化优势根植于其材料本征属性。

表 1：三种材料物理参数对比

| 材料 | 密度 (g/cm³) | 相对密度 (钢=1) | 弹性模量 (GPa) |
|----|------------|------------|------------|
| 钢板 | 7.86       | 1.00       | 210        |

| 材料  | 密度 (g/cm³) | 相对密度 (钢=1) | 弹性模量 (GPa) |
|-----|------------|------------|------------|
| 铝合金 | 2.70       | 0.34       | 70         |
| 镁合金 | 1.74       | 0.22       | 45         |

资料来源：中国镁业官网、国家材料腐蚀与防护科学数据中心、《中外金属材料手册》

镁合金比铝合金轻 36%，比钢轻 78%。这一密度优势在汽车蒙皮应用中意味着显著的减重潜力。

以典型 SUV 为测算对象，其蒙皮覆盖面积一般约 22 m²，包括引擎盖（约 2.5 m²）、车门板×4（约 8 m²）、车顶盖（约 3.5 m²）、翼子板×2（约 2 m²）、行李箱盖（约 2.5 m²）、侧围外板等。

表 2：某经典车型减重测算

| 方案   | 材料  | 厚度 (mm) | 蒙皮总重 (kg) | 较钢板 减重 | 较铝板 减重 |
|------|-----|---------|-----------|--------|--------|
| 基准方案 | 钢板  | 0.7     | 约 121     | —      | —      |
| 铝板方案 | 铝合金 | 1.0     | 约 59      | 51%    | —      |
| 镁板方案 | 镁合金 | 0.8     | 约 31      | 74%    | 47%    |

注：铝板和镁板厚度已考虑刚度补偿（铝增厚约 40%，镁增厚约 15%）。镁合金虽弹性模量较低，但其比刚度（弹性模量/密度）与钢、铝相当，通过合理的结构设计和厚度补偿可满足蒙皮刚度要求。

关键结论：单车蒙皮全面镁合金化，较钢板方案可减重约 90kg，较铝板方案可减重约 28kg。

对于新能源汽车而言，根据电池专家杨伟斌的研究，汽车整车重量每降低 10%，续航里程增加 5%-8%，百公里电耗下降 5%-6%。把现在的镀锌板替换为镁合金板后，不仅减重，成本还下降，车企有极强的动力更换。

### 3.2 单车镁合金用量并喷已具备条件

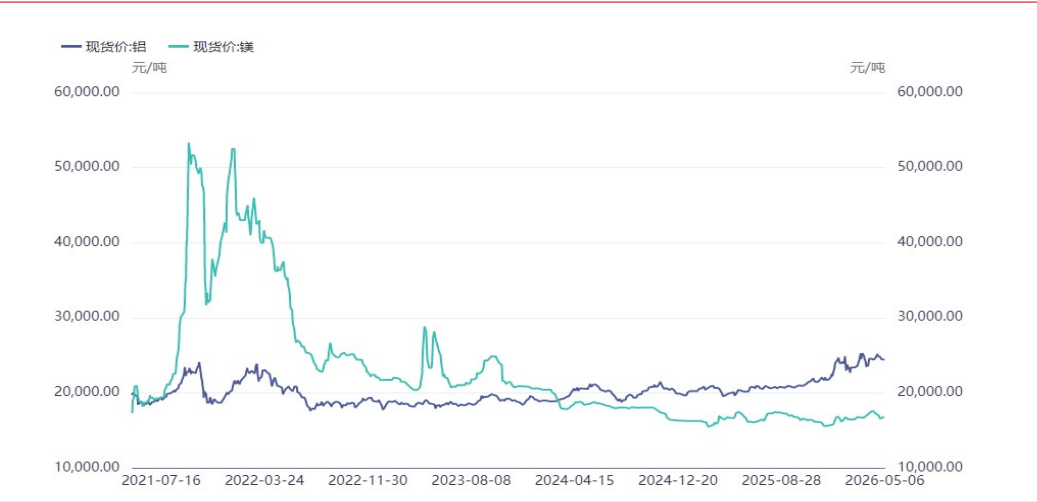
当前镁合金在汽车领域的应用仍处于起步阶段。2025 年国内新能源汽车镁合金单车用量约 20kg，而铝合金用量达到 150-250Kg，平均 200kg。镁合金主要应用于方向盘骨架、仪表盘骨架、转向支架、座椅骨架等内饰与底盘非外露件，

尚未规模化进入蒙皮领域。

但趋势正在加速。赛力斯问界品牌的单车用镁量已超过 20kg，且均为宝武镁业供应，应用范围从电驱壳体、减震塔扩展至后车体等结构件。宝武镁业在投资者互动中明确表示，随着镁大型压铸件（电驱壳体、后地板、门内板）陆续上车，单车用镁量有望达到 50kg 至 100kg。若门内板、引擎盖内板等蒙皮相关部件实现镁合金替代，单车用量将进一步提升。

2024 年以来，镁铝价格关系发生了历史性反转。2025-2026 年，镁锭现货价格维持在 1.7-1.8 万元/吨区间，而铝锭现货价格在 2.0-2.5 万元/吨区间运行，镁价较铝价低约 15%-20%，镁铝价格比降至 0.7-0.8:1 的历史低位。这意味着“以镁代铝”不仅减重效果更优（轻 36%），材料成本反而更低。

图 5：2021-2026 年现货镁和现货铝价格对比



资料来源：iFIND

从长期供需格局看，这一价格关系具有持续性。镁供给端，中国已探明白云石镁矿基础储量达数十亿吨（以氧化镁计），占全球 70% 以上。宝武镁业作为全球龙头，白云石矿储量可提取镁金属量达 2.3 亿吨，居全球首位。铝供给端，中国铝土矿对外依存度超 50%，国内电解铝产能面临 4500 万吨总量控制天花板。全球铝市场供需趋紧，价格中枢预计维持高位。预计镁铝价格比有望在较长时间内维持 1:1 以下的低位，“以镁代铝”的成本窗口具有持续性。

加工成本端，半固态成型等新工艺初期加工费较铝压铸高 30-50%，但随着规模化生产摊薄和工艺成熟度提升，这一差异正在快速收窄。

国家层面对镁合金产业化应用的扶持力度持续加大，从政策与标准两个维度

为产业规范化发展提供保障。标准层面，2025 年 12 月，国家标准委正式发布修订后的《压铸镁合金》（GB/T 25748-2025），将于 2026 年 7 月 1 日起全面实施。新国标针对性提升镁合金在耐腐蚀、高强度等方面的性能，可满足新能源汽车等高端场景的精密压铸需求，也为镁合金蒙皮外覆盖件应用奠定了关键的标准基础。

### 3.3 核心技术瓶颈与突破进展

尽管产业化窗口已经打开，镁合金要规模化进入蒙皮领域，仍需跨越耐腐蚀性、成形性和异种材料连接三大技术门槛。当前，这些瓶颈均已从原理层面取得实质性突破，正处于从“实验室验证”向“工厂量产”过渡的关键阶段。

耐腐蚀性从“阿喀琉斯之踵”到“可工程化解决”。镁的标准电极电位极低（ $-2.37\text{V vs. SHE}$ ），化学性质极为活泼，在潮湿、盐雾、酸性环境中极易发生电化学腐蚀，这是其长期无法用于车身外覆盖件的核心障碍。当前，行业已形成“内修基体+外筑屏障”的双路径技术解决方案。路径一是基体合金化与纯净化。通过添加稀土元素（RE）、钙（Ca）等合金元素提升镁合金本身的电极电位，同时严格控制铁、镍、铜等有害杂质元素含量（ $\text{Fe}<50\text{ppm}$ ,  $\text{Ni}<20\text{ppm}$ ），从根源上降低腐蚀倾向。新国标新增的 YZMgAl4RE4 等含稀土牌号即是这一技术路线的标准化体现。路径二是表面处理技术构建防护屏障。微弧氧化技术（MAO）：通过在电解液中施加高压放电，在镁合金表面原位生长出致密的陶瓷质氧化膜层。中科院金属研究所开发的微弧氧化工艺，经 336 小时盐雾实验评级达 9 级（最高 10 级），溶液使用寿命超十年。通过在电解液中添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  等纳米颗粒或稀土元素，可进一步封孔致密化，提升膜层耐蚀性。

蒙皮应用的特殊挑战在于：不仅要耐腐蚀，还要满足 A 级曲面（Class-A Surface）的外观质量要求。华清高科研发的镁合金高装饰技术，已能实现与铝合金涂装后相近的哑光或亮光质感。从技术验证角度看，耐蚀性与外观两大核心指标均已突破，下一步需要的是量产工艺稳定性和整车级耐久性验证（5-10 年周期）。

成形性在半固态成型技术方面实现突破。镁的密排六方（HCP）晶体结构导致室温塑性差、加工硬化率高，传统冷冲压工艺难以成形复杂蒙皮件。通用汽车早在 2012 年就尝试热压镁技术，需将板材加热至  $250-450^\circ\text{C}$  方可成形，效率低、能耗高、成本贵，未能实现产业化推广。半固态成型技术的成熟正在改变这一局



面。该技术在金属凝固过程中的固液两相区（固相分数约 30-50%）进行成形，具有以下核心优势：组织致密：球状初生相均匀分布于液相中，大幅减少缩孔、气孔等铸造缺陷；耐蚀性提升，致密组织减少腐蚀介质渗透通道，相较传统压铸耐蚀性显著改善；力学性能优异，强度和延伸率均优于传统铸件。

2024 年 12 月，上汽集团发布了全球首款采用半固态加工技术量产的镁合金电驱壳体，无需保护气体、能耗降低、符合全球绿色制造标准。

异种材料连接已解决电化学腐蚀。镁蒙皮与钢骨架连接时，由于二者电极电位差悬殊（镁约-2.37V，钢约-0.44V），接触面在潮湿环境中极易发生剧烈的电偶腐蚀，这是镁蒙皮装车的“最后一公里”工程难题。行业解决方案包括多层级防护策略：（1）物理隔离，在镁-钢接触面设置隔离垫片（如高分子材料或铝制过渡层），阻断电偶腐蚀回路；（2）

结构设计优化，避免连接区域积水、积尘，设置排水通道和通风结构；（3）专用防腐涂层体系，连接区域局部施加高耐蚀涂层或密封胶；（4）紧固件选型，选用与镁电位接近的铝制或镀铝紧固件。

小结：三大技术瓶颈——耐腐蚀性、成形性、异种连接——均已从原理层面取得突破。新国标将盐雾腐蚀性能纳入强制要求，标志着耐蚀镁合金已具备标准化应用的基础。预计未来 3-5 年内，耐蚀镁合金蒙皮的量产工艺将趋于成熟，率先在车门内板、行李箱盖内板等非外露或半外露蒙皮件实现规模化应用，随后逐步向引擎盖外板、车门外板等 A 级曲面外露件渗透。

### 3.4 全球镁合金蒙皮需求量测算

我们测算了 2026-2035 全球新能源汽车（分为乘用车、客车、货车三类）的销量，测算依据：（1）新能源乘用车，2025 年全球新能源乘用车销量数据来源有 4 个权威机构，分别是中国乘联会、EVTank、EV-Volumes、Rho Motion，我们采用了其中数量最低的一家（Rho Motion，2070 万辆），2026-2035 年每年增长 14%（ABI Research 预测）；（2）新能源客车，根据国际能源署（IEA）《Global EV Outlook 2025》，2025 年的数据大致在 7 万辆左右（四舍五入），根据 Global Market Insights 预测 2026-2035 年均增速 10%左右，测算每年销量；（3）新能源货车，数据同样来源于国际能源署和 Global Market Insights。

表 3：全球新能源汽车分类预测

| 年份   | 新能源乘用车（万辆） | 新能源客车（万辆） | 新能源货车（万辆） | 合计（万辆） |
|------|------------|-----------|-----------|--------|
| 2026 | 2,360      | 8         | 10        | 2,377  |
| 2027 | 2,690      | 8         | 11        | 2,710  |
| 2028 | 3,067      | 9         | 12        | 3,088  |
| 2029 | 3,496      | 10        | 13        | 3,520  |
| 2030 | 3,986      | 11        | 14        | 4,011  |
| 2031 | 4,544      | 12        | 16        | 4,572  |
| 2032 | 5,180      | 14        | 18        | 5,211  |
| 2033 | 5,905      | 15        | 19        | 5,939  |
| 2034 | 6,732      | 17        | 21        | 6,769  |
| 2035 | 7,674      | 18        | 23        | 7,715  |

资料来源：Rho Motion、Global Market Insights、ABI Research、国际能源署

注：中国乘联会的 2025 年度的数据是我们根据乘联会 1-11 月的 2033 万辆预估得到。

由于不同车型蒙皮面积差异较大，根据不同类型车的平均蒙皮面积、镁合金的密度，可以客观假设乘用车镁合金蒙皮重量 31 公斤，客车 300 公斤，货车 130 公斤；同时假设 2026-2035 年，镁合金蒙皮渗透率每年提高 10%，则可以测算出未来几年全球车辆蒙皮需求量：

**表 4：2026-2035 全球汽车镁合金蒙皮需求量**

| 年份   | 新能源乘用车（万吨） | 新能源客车（万吨） | 新能源货车（万吨） | 合计（万吨） |
|------|------------|-----------|-----------|--------|
| 2026 | 7.32       | 0.23      | 0.13      | 7.68   |
| 2027 | 16.68      | 0.51      | 0.28      | 17.47  |
| 2028 | 28.52      | 0.84      | 0.47      | 29.83  |
| 2029 | 43.35      | 1.23      | 0.69      | 45.27  |
| 2030 | 61.78      | 1.69      | 0.94      | 64.41  |
| 2031 | 84.51      | 2.23      | 1.24      | 87.99  |

|      |        |      |      |        |
|------|--------|------|------|--------|
| 2032 | 112.40 | 2.86 | 1.60 | 116.86 |
| 2033 | 146.44 | 3.60 | 2.01 | 152.05 |
| 2034 | 187.81 | 4.46 | 2.48 | 194.75 |
| 2035 | 237.89 | 5.45 | 3.03 | 246.37 |

## 4、产业链受益环节

镁合金蒙皮产业化将沿“上游资源→中游设备→下游材料加工”的产业链逐级传导。核心受益标的集中在具备资源壁垒、技术先发优势和客户卡位的企业。

上游：镁资源与原材料冶炼。中国掌握全球镁资源的绝对话语权。已探明白云石镁矿基础储量占全球 70%以上。这一资源禀赋决定了中国企业在镁合金产业链中具有天然的竞争优势，与铝土矿高度依赖进口形成鲜明对比。宝武镁业是全产业链龙头。

中游：设备无上市公司。蒙皮用镁板要求宽幅（1.2-1.8 米）、薄规格（0.7-2.0mm）、大卷重（≥1 吨）。核心设备为镁合金板材轧制机组，按工艺路线可分为双辊铸轧机组（短流程新技术）和热轧+冷轧联合机组（传统主流工艺）两大类。关键配套设备包括开卷机、卷取机、在线加热装置、矫直机等。目前设备制造主要由北方重工、中冶设备总院、达涅利等企业主导。

下游：镁合金薄板生产。目前虽有企业（如宝武镁业）生产镁合金板材，但主要用于建筑模板，业内尚无企业生产汽车蒙皮用镁合金板。但未来随着镁合金进入蒙皮领域，不排除现有知名的镁合金零部件生产企业（如宝武镁业、博俊科技、星源卓镁、万丰奥威等等）布局蒙皮用镁合金板材业务。

作者单位：财达证券投行委研究部课题组